

Leitfaden zum Vakuumversuch V70

(Stand November 2017)

Versuchsziele:

1. Im Rahmen dieses Versuchs sollen die Grundlagen der Vakuumphysik und
2. der Umgang mit Komponenten der Vakuumtechnik erlernt werden.

Aufgaben:

1. Aufbau eines Pumpstandes zur Bestimmung der Evakuierungskurve $p(t)$ einer Drehschieberpumpe sowie für eine Turbomolekularpumpe (kurz Turbopumpe).
2. Bestimmung des effektiven Saugvermögens beider Pumpentypen:
 - a.) anhand der Evakuierungskurven ($p(t)$ -Kurven)
 - b.) und vergleichsweise mit Hilfe von Leckratenmessungen ($p(t)$ -Kurven).
3. Darstellung des effektiven Saugvermögens in Abhängigkeit des Drucks.

Theorie und Grundlagen (Stichworte):

- Definition des Vakuums
- Ideales Gas, Boylesches Gesetz, Herleitung der $p(t)$ -Kurve aus der Zustandsgleichung für ideale Gase
- Druck, Partialdruck, Druckeinheiten, Druckbereiche, Teilchenzahldichte, Teilchengeschwindigkeit, mittlere freie Weglänge
- Laminare Strömung, molekulare Strömung, Leitwert
- Gasstrom, Saugleistung, Saugvermögen und effektives Saugvermögen einer Vakuumpumpe, Leitwert eines Rohres
- Adsorption, Absorption, Desorption, Diffusion, "virtuelle" Lecks
- Funktionsweise einer Drehschieber- und Turbomolekularpumpe
- Funktionsweise der Vakuummessung mit Penning, Kalkathode, Glühkathode (Bayard-Alpert)

Vorbereitungen:

Machen sie sich anhand von Internet- und Literaturrecherchen über die in **Theorie und Grundlagen** genannten Stichworte kundig. Des Weiteren machen sie sich die Funktionsweise von unterschiedlichen Pumpentypen sowie diversen Vakuummessgeräten klar. Beachten sie dabei für welche Druckbereiche Pumpen und Messgeräte sinnvoll einsetzbar sind und welche Vor- bzw. Nachteile die unterschiedlichen Pumpen bzw. Messgeräte besitzen. **Wir empfehlen dringend den kompletten Theorieteil des Protokolls als Vorbereitung zur Versuchsdurchführung in schriftlicher Form auszuarbeiten und bei der Versuchsvorbesprechung vorzulegen!**

Versuchsdurchführung:

- Machen sie sich mit den zum Versuch gehörenden Geräten und Komponenten vertraut. Dazu gehören: Pumpen, Messgeräte (Skalierungen), Pumpkammern, Rohrstücke (Kreuz-, T-Stücke), Schläuche, ISO-Kleinflansch-(KF)-Verbindungen (Dichtungen, Zentrierringe, Spannringe), Kugel-, Nadel- und Eckventile, usw ...
- Bauen sie mit den vorhandenen Vakuumkomponenten einen Pumpstand, d.h. einen Rezipienten mit allen notwendigen Pumpen, Ventilen, Rohrstücken, Dichtungen, Messanschlüssen usw. auf.

- Prüfen sie ihren Aufbau mit der Vorvakuumpumpe auf Dichtigkeit. Mit der Drehschieberpumpe sollte sich nach einigen (max. 10) Minuten ein **Enddruck p_E im Bereich von 0,03 mbar bis 0,05 mbar** (Anzeige: Pirani-Messgeräte) einstellen. Ist dies nicht der Fall suchen sie mit geeigneten Maßnahmen (Blindflanschen, Ventile schließen, Umbaumaßnahmen, usw.) mögliche undichte Stellen. Vor der ersten Messung sollte der Rezipient zusätzlich einmal für einige Minuten mit der Turbopumpe evakuiert werden, um z.B. Wasseranlagerungen von der Innenoberfläche des Rezipienten zu entfernen (z.B. Erwärmen mit Heißluftfön) und somit die Desorptionsrate zu verringern. Gleichzeitig kann damit die Dichtigkeit des Pumpstandes auch für den Betrieb mit der Turbopumpe überprüft werden. Wenn ein Druck im Bereich **$2 \cdot 10^{-5}$ mbar bis $8 \cdot 10^{-5}$ mbar** erreicht wird, gilt der Aufbau als dicht.

I.) Messungen zur Drehschieberpumpe:

- Ist der Pumpstand ausreichend dicht, können sie die **Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe** aufnehmen. Dazu die Turbopumpe "abschiebern" (V1 und V5 schließen) und V2 öffnen. Dann belüften sie mit einem Belüftungsventil (D1 und V3) bei laufender Pumpe "kurz" den Rezipienten (Startwert Normaldruck p_0 ca. 1000 mbar bei $t = 0$) und messen anschließend den **Druckabfall** (am Pirani: Analog- und/oder Digitalmessgerät) gegen die Zeit mit der Stoppuhr bzw. mit dem Smartphone (typische Messzeit: 180-300 sek). Je nach Dichtigkeit des Rezipienten sollte ein Enddruck zwischen 0,04 und 0,06 mbar erreicht werden. Führen sie diese Messung **5-mal** durch. Bei der späteren Auswertung können sie dann einen Mittelwert ansetzen. Wie genau können sie den Druck und die Zeit messen? Fehlerbetrachtungen nicht vergessen. Beachten sie später bei der Auswertung, dass das Saugvermögen S druckabhängig ist. Die Herleitung für den exponentiellen Druckabfall mit der Zeit gilt nur für $S(p) = \text{konst.}$ Nach dem Logarithmieren ist zu erkennen, dass sich die Geradensteigung abschnittsweise ändert. Suchen sie nach Abschnitten mit linearem Verhalten (typisch 2-3 Abschnitte) und führen sie für diese Bereiche lineare Regressionen durch (Geradenfit mit einem linearen Zusammenhang).
- Das Saugvermögen S einer Pumpe kann auch mit Hilfe der **Leckratenmessung** bestimmt werden (siehe "Jena-Skript" V 206). Dazu stellen sie bei laufender Drehschieberpumpe mit Hilfe des Nadelventils einen konstanten Gleichgewichtsdruck p_g im Rezipienten ein (**4 Messungen bei z.B. $p_g = 0,1; 0,4; 0,8$ und $1,0$ mbar** jeweils über ca. eine Größenordnung) und "schiebern" dann die Vorpumpe mit V4 ab. Dann nehmen sie den **Druckanstieg** mit der Zeit auf. Auch hier sollten sie einen geeigneten Druckbereich für sinnvoll machbare Zeitmessungen wählen. Führen sie die Messung für jeden Gleichgewichtsdruck **3-mal** durch. In der Auswertung sollten sich Geraden ergeben. Stellen sie später in der Auswertung ebenfalls das Saugvermögen S als Funktion des Gleichgewichtsdrucks p_g dar. Tragen sie in dieser Darstellung zum Vergleich auch die Ergebnisse aus den Evakuierungsmessungen zu den passenden Druckbereichen ein.
- Schätzen sie für die spätere Auswertung die Fehler ihrer Messgrößen ab. Beachten sie die am Messgerät benutzte Messskala (logarithmisch, linear).

II.) Messungen zur Turbomolekularpumpe:

- Als Nächstes führen sie die gleichen Messungen mit der Turbopumpe durch. Dazu müssen sie V1 und V5 öffnen sowie V2 schließen. Bevor sie die Turbopumpe einschalten ("Start" auf dem Steuergerät drücken), sollte das mit der Drehschieberpumpe erzeugte Vorvakuum besser als 0,1 mbar sein. Die Turbopumpe erhöht die Drehzahl langsam aber hörbar bis 1350 Hz (siehe Anzeige an der Steuereinheit). Erst jetzt sollten sie das Glühkathoden-Vakuummeter einschalten und den Druck messen (untere lineare Skala). Um die Kathode zu schützen, schaltet das Glühkathodenmessgerät normalerweise bei schlechtem Vakuum (zu hohem Druck) automatisch ab. **Trotzdem sollten sie dieses Messgerät bitte nicht bei zu schlechtem Vakuum ($> 1 \cdot 10^{-2}$ mbar) betreiben! Ansonsten kann die Kathode durchbrennen.** Läuft die Turbopumpe einige Zeit (> 15 Minuten, während Mittagspause laufen lassen), sollte der Druck unter **ca. $5 \cdot 10^{-5}$ mbar** abfallen.

- Nun können sie die **Evakuierungskurve $p(t)$ der Turbopumpe** aufnehmen. Dazu belüften sie den Rezipienten bei laufender Turbopumpe und geöffnetem Ventil zur Turbopumpe vorsichtig über das Nadelventil bis zum Vorvakuum (**$5 \cdot 10^{-3}$ mbar**). Jetzt können sie das Nadelventil und Kugelventil (möglichst schnell) schließen und gleichzeitig die Stoppuhr starten. Die $p(t)$ -Kurve messen sie nach wenigen Sekunden im 10^{-4} mbar-Bereich. Führen sie diese Messung mindestens **5-mal** durch (Messzeit jeweils ca. 120 sek).
- Die Bestimmung des Saugvermögens der Turbopumpe anhand der **Leckratenmessung** läuft analog zur Messung mit der Drehschieberpumpe. Sie stellen, bei geöffnetem Ventil zur Turbopumpe, mit dem Nadelventil einen Gleichgewichtsdruck p_g d.h. eine definierte Leckrate ein und messen zeitgleich mit dem Schließen des Ventils (V_1) zur Turbopumpe die Druckerhöhung mit der Zeit. Führen sie diese Messung bei **mindestens 4 Leckraten** (z.B. p_g im Bereich: 5 mbar bis $20 \cdot 10^{-5}$ mbar) jeweils **3-mal** durch (Messzeit jeweils ca. 60 sek).

III.) Volumenbestimmung:

- Nachdem die o.g. Messungen abgeschlossen sind, müssen sie noch das Volumen des Rezipienten bestimmen. Dazu berechnen sie die Volumina aller Vakuumkomponenten und addieren sie auf. Messen sie dazu mit dem Lineal/Maßband und einer Schieblehre jeweils den Innendurchmesser und die Länge der einzelnen Komponenten. Bei der Volumenberechnung können sie von einer Zylindersymmetrie ausgehen.
Beachten sie, dass das Gesamtvolumen jeweils ab dem Ansaugstutzen bzw. Abschieberventil der jeweiligen Pumpe berechnet werden muss und daher für die verschiedenen Messungen nicht identisch sein kann. Schätzen sie auch hier den Messfehler der Volumenberechnung für die spätere Auswertung ab (Fehlerfortpflanzung).
- Entnehmen sie aus dem Betriebsheft bzw. dem Aufkleber auf der Pumpe das von den Herstellern angegebene "theoretische" Saugvermögen (Herstellerangabe). Unter welchen Bedingungen werden diese Werte erreicht?

Protokoll und Auswertung

- Beschreiben sie in ihrem Protokoll die oben genannten Versuchsziele und theoretischen Grundlagen kurz und knapp (Bilder sagen oft mehr als 1000 Worte). Nennen sie auch Anwendungsfelder der Vakuumphysik bzw. Vakuumtechnik. Geben sie dabei ihre Quellen an und kennzeichnen sie die Zitate deutlich.
- Vakuumerzeugung:
Gehen sie auf die verschiedenen Pumpentypen und Kategorien (Transport-, kinetische und Speicher-Pumpen) ein und beschreiben sie die Funktionsweise der benutzten Pumpen (Drehschieber- und Turbopumpe). Welche Druckbereiche werden von welchen Pumpen abgedeckt?
- Vakuummessung:
Beschreiben sie die unterschiedlichen Messverfahren der im Versuch eingesetzten Vakuummeter: Pirani- sowie die Kalt-, und Glühkathoden-Ionisations-Vakuummeter (Bayard-Alpert-Glühkathode). Welche Messbereiche werden abgedeckt?
- Beschreiben sie ihren Versuchsaufbau mit beschrifteten Skizzen (schön wäre mit den DIN 28401-Symbolen der Vakuumtechnik, siehe Anhang) und mindestens einem Foto ihres Messaufbaus.
 - Welche Geräte wurden eingesetzt? (Handbücher liegen aus)
 - Wie wurde das Fein- und Hochvakuum hergestellt?
 - Welche Probleme sind aufgetreten? (Ursachen, mögliche Fehlerquellen)
- Beschreiben sie den Ablauf der Versuchsdurchführung.

- Wie wurde was gemessen?
- Mögliche Fehler erörtern (Genauigkeit der Messgeräte, siehe Handbücher oder Internet-Recherche, weitere Fehlerbetrachtungen).
- Auswertung:
 - Messreihen auflisten (Voluminabestimmung bitte nachvollziehbar dokumentieren, p(t)-Evakuierungskurven, Leckratenmessungen). **Originalmitschriften bitte eingescannt an das Protokoll anfügen!**
 - Fehlerrechnung / Fehlerfortpflanzung bitte mit Herleitung der bei den o.g. Messreihen angesetzten Fehlergleichungen.
 - Plots aller Messreihen mit Fehlerbalken sowie Fits der Kurven: Sie messen zu jedem Druck mehrfach die Zeit. Daher können die Zeiten gemittelt werden. Zu jeder Messung gibt es daher Graphen des Druckverlaufs gegen die gemittelte Zeit.
 - p(t)-Evakuierungskurven als e-Fkt und in einer sinnvollen Logarithmus-Darstellung, $\ln[(p(t)-p_E)/(p_0-p_E)]$ -Werte bitte in den Tabellen mit den Fehlern aufführen, Ausgleichsgeraden für unterschiedliche Druckbereiche berechnen, da das Saugvermögen $S(p)$ nicht konstant ist. Berücksichtigen sie dabei Anfangs- und End- bzw. Gleichgewichtsdruck (p_0, p_E, p_g).
 - Alle Leckratenmessungen mit linearer Regression. Bitte auch die Startwerte als Messwerte eintragen.
 - Alle Ergebnisse mit Fehlerangabe
 - Als Endergebnis für jede Pumpe in einem Plot das effektive Saugvermögen gegen Druck aus den jeweiligen Evakuierungs- und Leckratenmessungen zusammenfassen (je in einem Plot pro Pumpe!).

Beispiel: Tabelle einer p(t)-Evakuierungsmessung:

Druck P / mbar	$\ln[(p(t)-p_E)/(p_0-p_E)]$ +/- Fehler	$t_{1...i} / s$ min. 5 Spalten	Mittelwert $t_{1...i} / s$ +/- Fehler / s

Beispiel: Tabelle einer p(t)-Leckratenmessung:

Druck P / mbar	$t_{1...i} / s$ min. 3 Spalten	Mittelwert $t_{1...i} / s$ +/- Fehler / s

Beispiel:

Teilausgefüllte Volumentabelle zur Volumenberechnung des Rezipienten

(Das Volumen bitte in Liter umrechnen):

Nr.	Bezeichnung der Komponente	Durchmesser / mm +/- Fehler / mm	Länge / mm +/- Fehler / mm	Volumen / l +/- Fehler / l	Verwendung (Dreh, Turbo)
1	Tank (Summe B1)			9,5 +/- 0,8	D,T
2	langer Schlauch zur Drehschieberpumpe S2	29 +/- 2	1210 +/- 20	0,8 +/- 0,1	D
3	kurzer Schlauch S1	16 +/- 1	430 +/- 10	0,087 +/- 0,011	D
4	T-Stück klein B6			0,013 +/- 0,002	
5	T-Stück groß B3			0,25 +/- 0,01	
6	Kreuzstück klein B5			0,016 +/- 0,002	
7	Kreuzstück groß B2			0,177 +/- 0,09	
8	Handventil (rot) V5 offen			0,015 +/- 0,002	
9	Handventil (rot) V5 zu			0,005 +/- 0,001	
10	Handventil (gelb) V4			0,025 +/- 0,005	
11	Klappenventil V1 offen			0,044 +/- 0,004	
12	Klappenventil V1 zu			0,022 +/- 0,002	
13	Querschnittsverengung B4	40 +/- 1	53 +/- 1	0,067 +/- 0,004	
14	Belüftungsventil D1	-	-	0,0	zu vernachlässigen
15	Adapter 1 AB1 (optional)				
16	Adapter 2 AB1 (optional)				
17	Adapter 3 AB1 (optional)				
18	Schlauch AB1 (optional)				
19					
20					
	Summe			Gesamt- volumen / l +/- Fehler / l	

Diskussion der Ergebnisse

- Zusammenfassung der Endergebnisse
- Vergleich mit den Herstellerangaben
- Mögliche Unterschiede erklären (Desorption, Leitwert, S_{eff} , o.ä.), Fehlerquellen diskutieren
- Verbesserungsvorschläge

Literaturangaben

Neben Wikipedia finden sie weitere Infos bei:

1. Edelmann, Christian, "Vakuumphysik: Grundlagen, Vakuumerzeugung und -messung, Anwendungen", Gebundene Ausgabe, Spektrum Verlag – November 1997
2. Wutz, Adam, Walcher, "Theorie und Praxis der Vakuumtechnik", Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1992
sowie
3. z.B. auf der Pfeiffer-Vakuum-Homepage:
<http://www.pfeiffer-vacuum.de/know-how/container.action>

- Zitieren sie bitte in ihrem Protokoll **alle** Quellen!

Weitere Hinweise

Das Deckblatt bitte mit: Versuchsname, Durchführungs- und Abgabedatum, Namen der Praktikusteilnehmer sowie Abgabedatum der Version des Protokolls versehen.

Erstellen sie Bilder vom Aufbau und übernehmen sie dann nur aussagekräftige, beschriftete Abbildungen in das Protokoll.

Benutzen sie bei der Auswertung nur die signifikanten Stellen.

Rechnen sie in sinnvolle Einheiten um.

Zwischen Maßzahl und Einheit ist immer ein Leerzeichen.

Vor und nach dem Gleichheitszeichen immer eine Lücke lassen.

Symbole in Formeln und im Text immer kursiv (z.B. Masse m oder Lichtgeschwindigkeit c)

Pumpen: Drehschieber Pfeiffer Duo 004A; Herstellerangabe für das Saugvermögen: 1,1 l/s
Turbo SST81 der Firma ILMVAC, bei 1350 Hz betrieben: Saugvermögen: 77 l/s

Messgeräte: Thermovac TR205 (Penning) von Leybold-Heraeus (Genauigkeit: 20%)
Glühkathode Ionivac IM210 von Leybold-Heraeus (Genauigkeit: 10% lineare Skala)
(Kaltkathode PKG020 von Balzers)

4. Version, November 2017

Tel.: Schirmer 5386 (DELTA Raum 18)

detlev.schirmer@tu-dortmund.de

Tel.: Schmidt 5382 (DELTA Raum 22)

gerald.schmidt@tu-dortmund.de

Anhang: Symbole der Vakuumtechnik

Tabelle 19.13 Bildzeichen für die Vakuumtechnik ¹⁾ (Auszug aus DIN 28 401)

Vakuumpumpen ²⁾

	Vakuumpumpe, allgemein
	Hubkolbenvakuumpumpe
	Membranvakuumpumpe
	Rotationsverdränger-Vakuumpumpe
	Sperrschieber-vakuumpumpe
	Drehschieber-vakuumpumpe
	Kreiskolben-vakuumpumpe ³⁾
	Flüssigkeits-ringvakuumpumpe
	Wälzkolbenvakuumpumpe
	Turbomolekularpumpe
	Treibmittel-Vakuumpumpe
	Diffusionspumpe
	Adsorptionspumpe
	Getterpumpe
	Verdampferpumpe
	Ionenzerstäuberpumpe

	Kryopumpe
	Radialvakuumpumpe
	Axialvakuumpumpe

Vakuumpumpenzubehör

	Abscheider, allgemein
	Abscheider mit Wärmeaustausch (z. B. gekühlt)
	Gasfilter, allgemein
	Filter, Filterapparat, allgemein
	Dampfsperre, allgemein
	Dampfsperre, gekühlt
	Kühlfalle, allgemein
	Kühlfalle mit Vorratsgefäß
	Sorptionsfalle
	Blende

Behälter

	Vakuumbehälter
	Vakuumglocke

Absperrorgane

	Absperrorgan, allgemein
	Absperrventil Durchgangsventil
	Eckventil
	Absperrhahn Durchgangshahn
	Dreiwegehahn
	Eckhahn
	Absperrschieber
	Absperrklappe
	Rückschlagklappe
	Absperrorgan mit Sicherheitsfunktion

Antriebe für Absperrorgane

	Antrieb von Hand
	Antrieb durch Elektromagnet
	Fluidantrieb (hydraulisch oder pneumatisch)
	Antrieb durch Elektromotor
	gewichtbetätigt

	Dosierventil
--	--------------

Verbindungen und Leitungen

	Flanschverbindung
	Flanschverbindung, geschraubt
	Kleinflanschverbindung
	Klammerflanschverbindung
	Rohrschraubverbindung
	Kegelschliffverbindung
	Muffenverbindung

	Kegelschliffverbindung
	Veränderung des Rohrleitungsquerschnittes
	Kreuzungen zweier Leitungen mit Verbindungsstelle ⁴⁾
	Kreuzung zweier Leitungen ohne Verbindungsstelle
	Abzweigstelle
	Zusammenfassung von Leitungen
	Bewegliche Leitung, (z. B. Kompensator - Verbindungsschlauch)
	Schiebedurchführung mit Flansch
	Schiebedurchführung ohne Flansch
	Drehschiebedurchführung

	Drehdurchführung
	elektrische Leitungsdurchführung

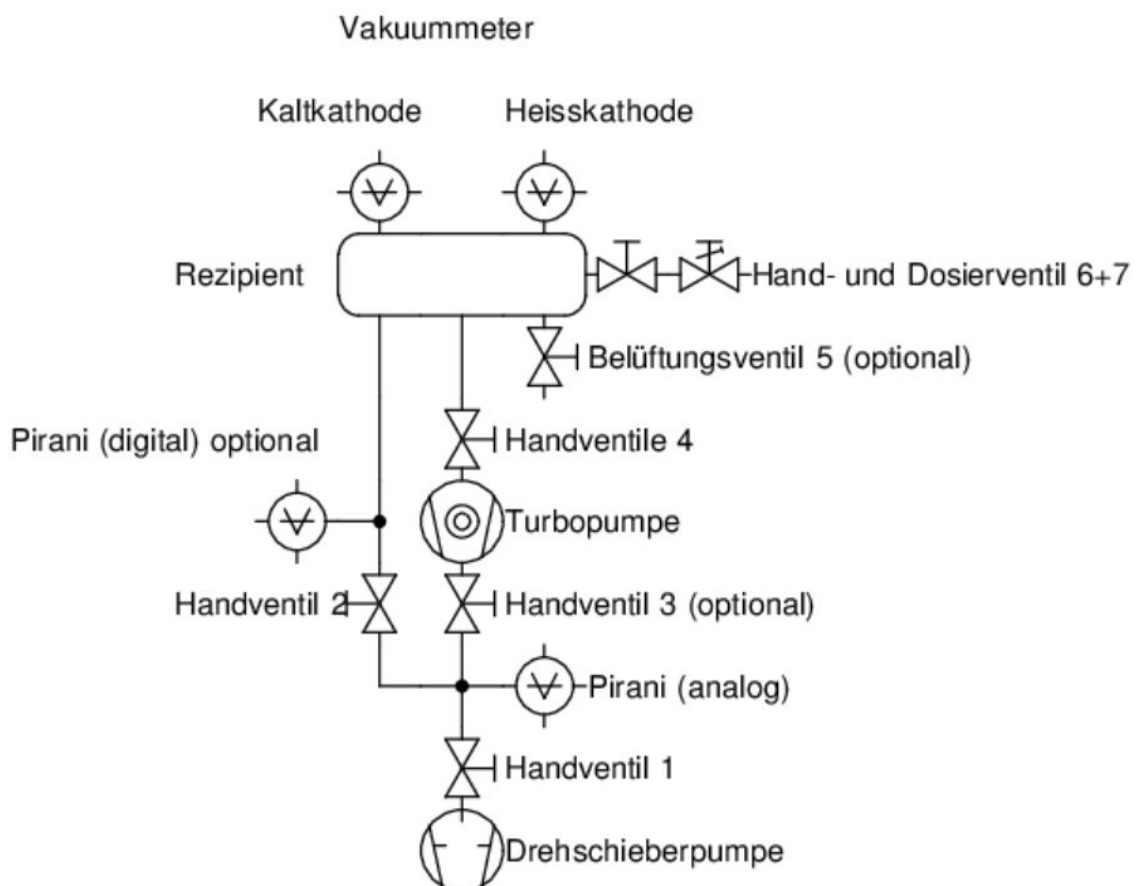
Meßgeräte

	Vakuummeter, Vakuummeßzelle ⁵⁾
	Betriebs- und Anzeigegerät für Vakuummeßzelle ⁵⁾
	Durchflußmessung

Hinweiszeichen

	Vakuum (zur Kennzeichnung von Vakuum) ⁵⁾
--	---

Anhang: Schematischer Aufbau des Vakuumversuchs



V70 Aufbauanleitung

Bitte verlassen sie den Versuch so wie auf dem Bild 1 dargestellt.
Blindflansch oder Deckelflansch an der Pumpenseite und am Tank anbringen.

Der Schlauch S2 zur Drehschieberpumpe bleibt angeschlossen und wird mit einem Kunststoffdeckel verschlossen. Kunststoffdeckel ebenfalls auf den Pirani-Messgeräten und auf der Ausgangsseite der Turbopumpe anbringen.

Die Bauteile können auch in den Schubladenschrank geräumt werden.

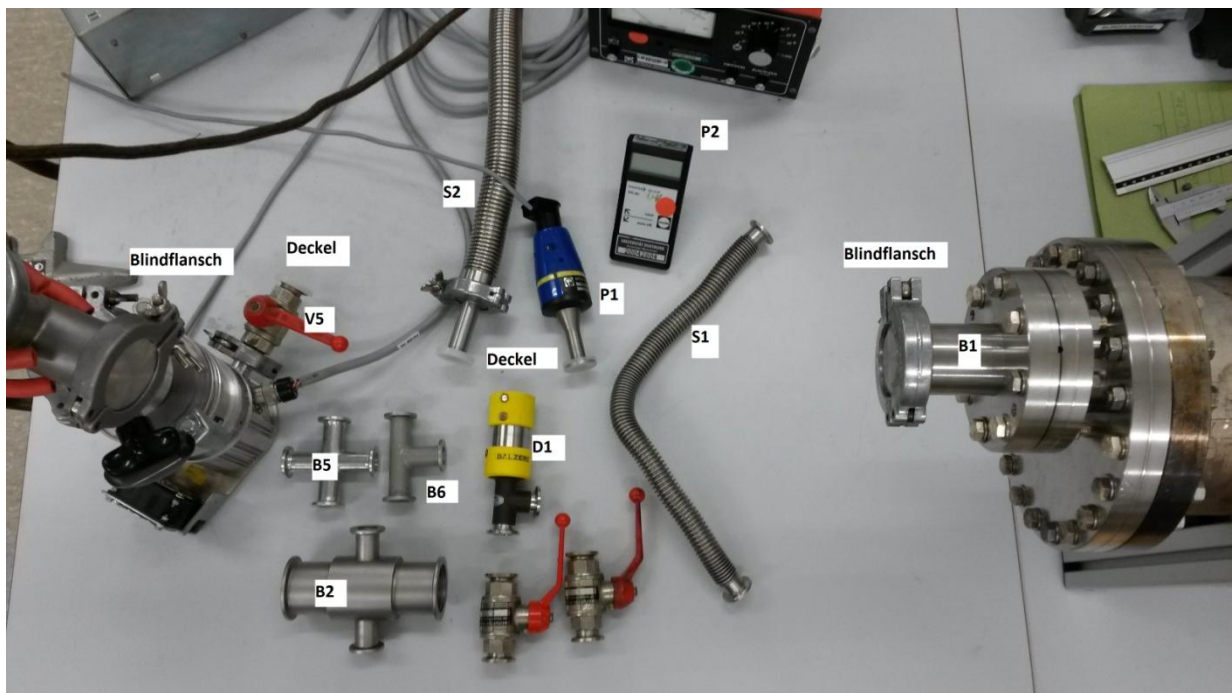


Bild 1

Zu Bild 1 bis Bild 4:

S1 = Schlauch 1

S2 = Schlauch 2 zur Drehschieberpumpe

D1 = Dosierventil 1

P1 = analoges Pirani Druckmessgerät

P2 = digitales Pirani Druckmessgerät

B1 = Baugruppe 1 = großer Rezipiententank

B2, B5 und B6 = Bauteile, die montiert werden müssen

B3 und B4 = Bauteile, die an der Turbopumpe montiert bleiben

V5 = Kugelventil 5 bleibt am Ausgang der Turbopumpe

V2 und V3 Kugelventile für die Montage liegen unterhalb von D1 in Bild 1 und müssen montiert werden (siehe Bild 2).

Der Aufbau sollte wie folgt aussehen:

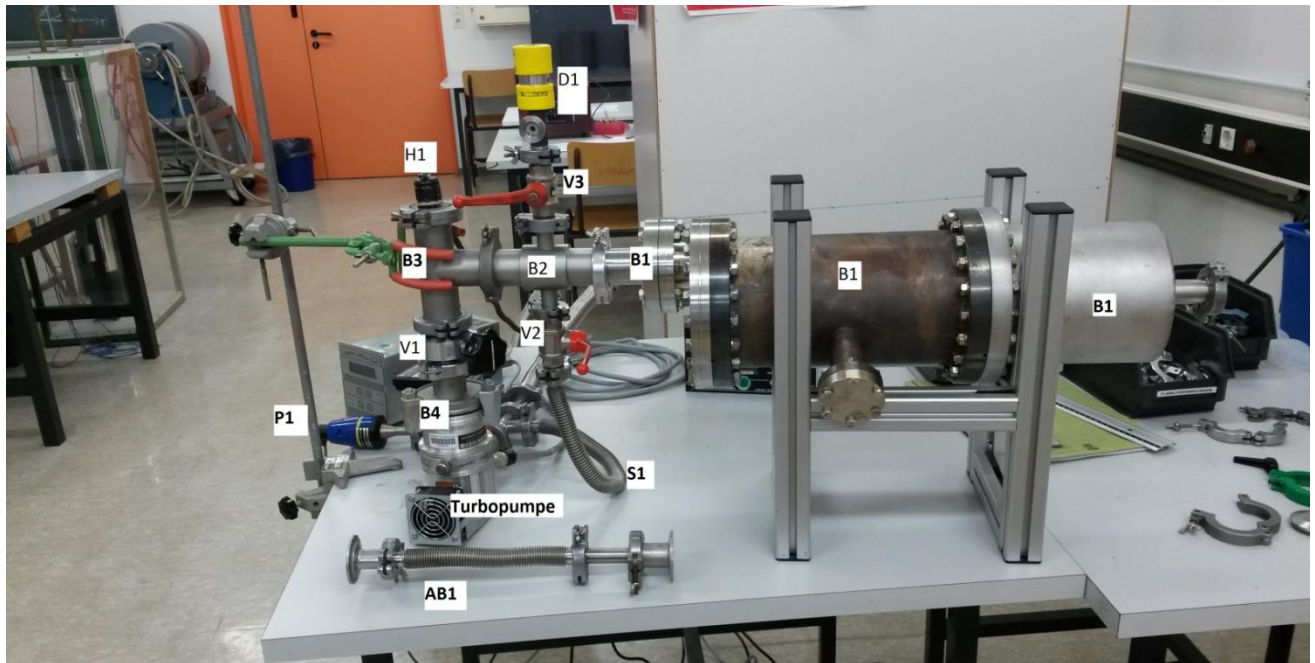


Bild 2

H1 = Glühkathode Messfühler (fest verbaut)

V1 = Klappenventil 1

V2 und V3 = Kugelventil 2 und 3

B4 = Baugruppe 4, Querschnittsverengung der Turbopumpen-Eingangsseite

AB1 = dünner Schlauch (dient zur Leitwertreduzierung, optional)

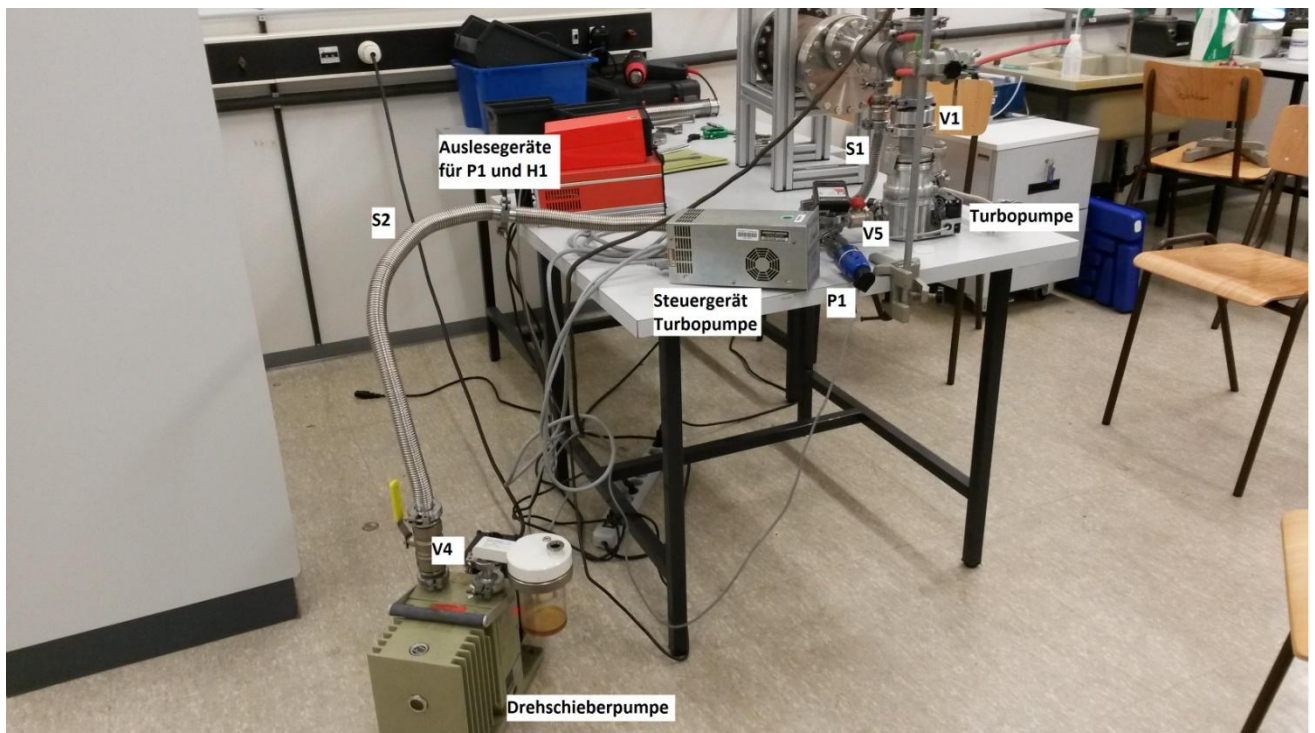


Bild 3

V4 = Kugelventil 4 (fest verbaut)

S2 = Schlauch 2 (bleibt mit V4 an der Drehschieberpumpe fest verbaut)

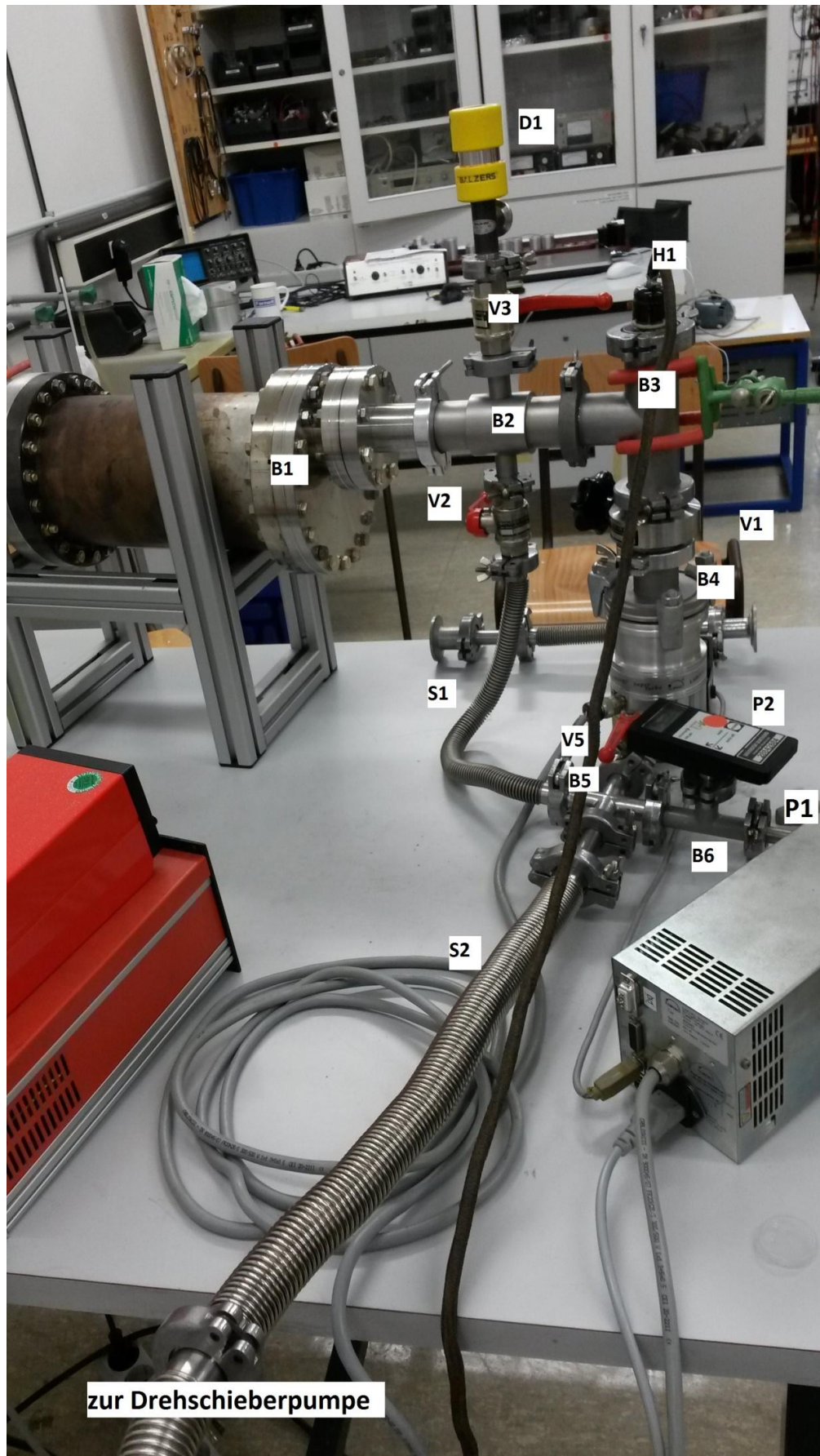


Bild 4

H1, B3, V1, B4, Turbopumpe und V5 bleiben fest verbaut und werden am Versuchsende mit Deckeln verschlossen (siehe Bild 1), Ventile V1 und V5 schließen.

Vakuumversuch - Saugvermögen aus p(t)-Kurven bestimmen

Das Saugvermögen S einer Vakuumpumpe ist der geförderte Volumenstrom.

Gemessen wird der Druck p als Funktion der Zeit t. Zur Bestimmung des Saugvermögens S muss ein Zusammenhang zwischen p(t) und S hergeleitet werden.

Annahmen:

- Der Druck p wurde in einem konstanten Volumen V gemessen.
- Das Gas im benutzten Druckbereich kann mit dem Modell des idealen Gases beschrieben werden.
- Die Temperatur T des Gases ist während der Messung konstant.
- Die Geschwindigkeit der Druckänderung ist so klein, dass ein Druck p(t) zu einem Zeitpunkt im gesamten Volumen herrscht und das sich zu jedem Zeitpunkt das Gas im thermodynamischen Gleichgewicht befindet (quasistatisch).
- Es gibt keine Lecks und kein Ausgasen (Desorption) von den Oberflächen.
- Das Saugvermögen S ist konstant; insbesondere unabhängig vom Druck p.

Für die Berechnung kann ein einfaches Modell der Pumpe benutzt werden: Kolbenpumpe mit einem einzigen Kolbenhub. Der Kolben in der Pumpe bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit, so dass die Zunahme des Volumens pro Zeit gleich S ist.

$$\dot{V} = S$$

Pumpe und Rezipient sind verbunden, es gibt keine Lecks. Also ist die Stoffmenge n im System aus Pumpe und Rezipienten konstant. Für die Zustandsgleichung des idealen Gases gilt:

$$p V = n R T$$

mit dem Volumen V des Systems, Druck p im System, absoluter Temperatur T des Gases und der Gaskonstante R.

Durch die Ableitung d/dt erhält man:

$$\frac{d}{dt} p V = \frac{d}{dt} n R T \quad (\text{mit: } (n R T) = \text{konstant})$$

$$\frac{dp}{dt} V + p \frac{dV}{dt} = 0 \quad (\text{aus der Produktregel})$$

$$\dot{p} V + p \dot{V} = 0$$

$$\dot{p} V = -p S$$

Das ist eine bekannte Differenzialgleichung. Der Lösungsansatz dazu lautet:

$$p(t) = p_0 \exp(-t/\tau)$$

$$\dot{p} = -\frac{p_0}{\tau} \exp(-t/\tau) = \frac{-p}{\tau}$$

Mit dem Anfangsdruck p₀ und einer zu bestimmenden Zeitkonstante tau.

Den Ansatz in die DGL einsetzen ergibt:

$$\frac{-1}{\tau} V = -S$$

$$\tau = \frac{V}{S}$$

Daraus folgt die gesuchte Abhängigkeit der Funktion p(t) vom Saugvermögen S:

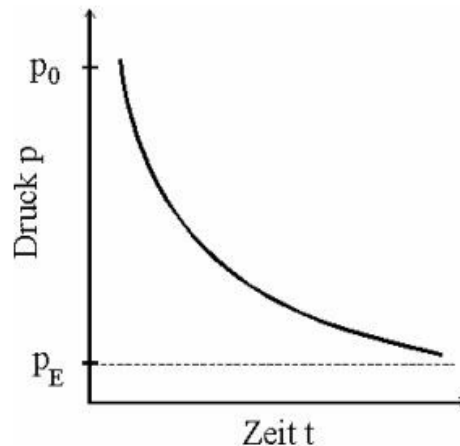
$$p(t) = p_0 \exp\left(\frac{-t S}{V}\right)$$

Unter Berücksichtigung eines endlichen erreichbaren Enddrucks p_E erhält man:

$$p(t) = (p_0 - p_E) \exp\left(-t \frac{S}{V}\right) + p_E$$

Die Begrenzung des Enddrucks ergibt sich zum einen aus unvermeidbaren Leckagen sowie dem Ausgasen (Desorption) der Innenwände des Rezipienten (virtuelle Lecks). Zudem durch die prinzipielle Funktionsweise der unterschiedlichen Pumpen (Totvolumen, Rückströmungen, endliches Kompressionsverhältnis usw.).

Das schematische $p(t)$ -Diagramm zeigt einen entsprechenden Kurvenverlauf.



Für die Auswertung gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Fit der gefundenen e-Funktion an die gemessenen Funktionswerte mit einem vorhandenen Programm. Nur sinnvoll wenn das Saugvermögen über den gesamten Druckbereich annähernd konstant ist. Siehe Bemerkung zu den Annahmen oben. Man erhält hiermit ein über den gesamten Druckbereich „gemitteltes“ Saugvermögen.
- Einfach logarithmische Darstellung der Funktion ergibt eine (bzw. mehrere) Gerade(n). Die Steigungen der Geraden können mit linearer Regression berechnet werden. Diese Art der Auswertung ist hilfreich, wenn das Saugvermögen vom Druck **abhängig** ist. Hiermit lässt sich das Saugvermögen für unterschiedliche Druckbereiche ermitteln.

Leckratenmessung:

Unter Verwendung der Leckrate Q und des Gleichgewichtsdruck p_g gilt ebenfalls:

$$S = Q/p_g \text{ mit } Q = V \cdot dp/dt \text{ folgt somit für das Saugvermögen: } S = V/p_g \cdot dp/dt$$

- Aus der gemessenen Steigung dp/dt lässt sich bei unterschiedlich eingestellten Gleichgewichtsdrücken p_g das Saugvermögen ebenfalls über eine Leckratenmessung bestimmen.

Leitwert:

Bestimmt man das Saugvermögen von Vakuumpumpen anhand der Druckänderung im Rezipienten, so sind die gemessenen Werte im allgemeinen deutlich niedriger als die Angaben des Herstellers S_0 . Die Ursache dafür liegt im Strömungswiderstand der Verbindungsleitungen einschließlich zwischengeschalteter Ventile u.ä.. Das effektive Saugvermögen S_{eff} am Rezipienten ergibt sich aus:

$$1/S_{\text{eff}} = 1/S_0 + 1/L$$

S_{eff} = Nennsaugvermögen der Pumpe am Ansaugstutzen,

S_0 = theoretisches Saugvermögen (Herstellerangabe)

L = Leitwert (reziproker Strömungswiderstand) der Verbindungen (Rohre, Schläuche, usw.):

Die Berechnung der Leitwerte ist in den einzelnen Vakuumbereichen aufgrund unterschiedlicher Strömungsmechanismen verschieden. Praktisch äußert sich das z.B. darin, daß die Rohrquerschnitte im Hochvakuumteil (molekulare Strömung) eines Pumpstandes sehr viel größer gewählt werden müssen als im Bereich des Vorvakuums (laminare Strömung). Dabei ändert sich der Leitwert mit der vierten (laminare Strömung) bzw. dritten Potenz (molekulare Strömung) des Querschnittes. Weitere Einzelheiten sind der Literatur zu entnehmen (Stichworte: viskose/laminare Strömung, Molekularströmung, Poiseuillesche Gleichung).